

减氮配施生物炭对滴灌棉田土壤 有机氮和棉花产量的影响

郝海波,李婷,刘凯,廖欢,杜姣荣,侯振安

(石河子大学农学院,新疆石河子 832003)

摘要:为缓解氮肥减施造成的土壤氮库失衡以及棉花产量降低的问题,于2022—2023年开展田间试验,设置6个处理:不施氮肥(N0)、常规施氮($300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N300)、氮肥减施20%($240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N240)、氮肥减施40%($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N180)、氮肥减施20%配施生物炭(N240+BC)、氮肥减施40%配施生物炭(N180+BC),研究不同氮肥减施比例配施生物炭对滴灌棉田土壤有机氮组分及棉花产量的影响。结果表明:(1)N240、N180、N180+BC处理土壤全氮含量均显著低于N300处理,N240+BC处理土壤全氮含量两年分别较N240处理显著增加19.49%和22.86%,与N300处理无显著差异。(2)土壤水溶性有机氮、颗粒有机氮和矿物结合态有机氮含量随氮肥减施比例增加出现不同程度降低;与N240处理相比,N240+BC处理土壤水溶性有机氮和颗粒有机氮含量分别显著增加25.28%和51.81%。(3)氮肥减施配施生物炭处理(N240+BC、N180+BC)氮库管理指数较相应减氮处理(N240、N180)分别显著提高48.12%~101.13%和17.97%~41.37%。(4)氮肥减施配施生物炭处理的土壤亮氨酸氨基肽酶、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶、纤维二糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性显著高于相应氮肥减施处理,增幅分别为30.90%~90.21%、11.24%~102.23%、11.45%~51.73%和10.92%~32.96%。(5)氮肥减施显著降低了棉花产量,且减产幅度随施肥年限的增加而增加;2023年N240+BC处理棉花产量较N240处理显著增加13.79%,同时其两年棉花产量与N300处理相比均无显著差异。综上,氮肥减施20%配施生物炭处理在有效维持土壤氮库容量和供氮能力的基础上保证了棉花产量,可作为新疆滴灌棉田的推荐施肥措施。

关键词:棉花;氮肥减施;生物炭;有机氮组分;土壤酶活性;产量

中图分类号:S158.3; S562 **文献标志码:**A

Effects of nitrogen reduction with biochar application on soil organic nitrogen and cotton yield in drip-irrigated cotton fields

HAO Haibo, LI Ting, LIU Kai, LIAO Huan, DU Jiaorong, HOU Zhenan

(College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: In order to alleviate the problem of soil nitrogen pool imbalance and reduced cotton yield caused by nitrogen fertilizer reduction, field trials were carried out from 2022 to 2023. The experiment was set up with six treatments: no nitrogen fertilizer (N0), conventional nitrogen application ($300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N300), 20% reduction of nitrogen fertilizer ($240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N240), 40% reduction of nitrogen fertilizer ($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N180), 20% reduction of nitrogen fertilizer with biochar (N240+BC) and 40% reduction of nitrogen fertilizer with biochar (N180+BC). Results indicated that (1) soil total nitrogen content of N240, N180, and N180+BC treatments was significantly lower than that of N300 treatment. The soil total nitrogen content in the N240+BC treatment increased significantly by 19.49% and 22.86% compared to the N240 treatment, while there was no significant difference compared to the N300 treatment. (2) The content of soil water-soluble organic nitrogen, particulate organic nitrogen, and mineral bound organic nitrogen decreased to varying degrees with the increase of nitrogen fertilizer reduction ratio. Compared with N240, the soil water-soluble organic nitrogen and particulate organic nitrogen content in

N240+BC treatment significantly increased by 25.28% and 51.81%, respectively. (3) Nitrogen fertilizer reduction with biochar (N240+BC, N180+BC) significantly increased the nitrogen pool management index by 48.12% ~ 101.13% and 17.97% ~ 41.37% compared to the corresponding nitrogen reduction treatments (N240, N180). (4) The activities of leucine aminopeptidase, N-acetyl- β -D-glucosidase, cellulase, and β -glucosidase in soil treated with reduced nitrogen fertilizer and biochar were significantly higher compared to those in treatments with reduced nitrogen fertilizer alone, with an increase of 30.90% ~ 90.21%, 11.24% ~ 102.23%, 11.45% ~ 51.73%, and 10.92% ~ 32.96%, respectively. (5) Reducing nitrogen fertilizer significantly decreased cotton yield, with the magnitude of reduction increasing over the years. In the second year, cotton yield in the N240+BC treatment significantly increased by 13.79% compared to the N240 treatment. However, there was no significant difference in cotton yield between the two years when compared to the N300 treatment. The results revealed that reducing nitrogen fertilizer by 20% combined with biochar significantly increased total nitrogen, water-soluble organic nitrogen, and particulate organic nitrogen in drip-irrigated cotton fields. This also improved the soil nitrogen pool management index and cotton yield, helping to sustain both the nitrogen pool capacity and the soil's nitrogen supply.

Keywords: cotton; nitrogen fertilizer reduction; biochar; organic nitrogen fraction; soil enzyme activity; yield

在农业生产中,施用化学氮肥对于提高作物产量和保障粮食安全发挥了重要作用,但为片面追求作物高产而过量施用化肥的现象较为普遍^[1]。棉花是新疆主要的经济作物,占全国棉花种植面积的82.76%^[2]。目前该地区棉花生产存在增肥不增产、氮肥利用效率低等问题。盲目过度施肥或不合理施肥不仅会导致氮素利用率下降及资源浪费,还会引起土壤酸化、温室气体排放、水体富营养化等一系列环境问题^[3]。因此,科学合理地减少化学氮肥施用量,提高氮肥利用率,对促进新疆棉花产业绿色可持续发展具有重要意义。

化学氮肥是我国农田土壤氮素的主要来源。氮肥可在土壤中存蓄较长时间,有研究发现,施用氮肥17年后仍有10%~13%的肥料氮残留在土壤中^[4]。残留氮主要以有机态氮的形式在土壤中积累,有利于维持土壤氮素的周转和持续供应。氮肥减量施用会改变土壤氮素平衡,降低耕层土壤氮素库容和氮库活性,常规种植密度下还可能导致作物减产^[5]。施用外源有机碳可降低土壤氮素损失,增加氮库容量,提高氮肥利用率^[6]。近年来,生物炭作为一种高碳氮比且稳定的土壤改良剂备受国内外学者关注^[7-8]。已有研究表明,施用生物炭在增加土壤有机氮含量方面有很大潜力^[9],施用生物炭可显著提高土壤全氮及有机氮组分含量,促进土壤氮素积累,提高土壤氮储量^[10],同时还能显著提高土壤活性有机氮含量。综上可知,施用生物炭可以增加土壤有机氮库容量,提高土壤供氮潜力,有助于缓解因氮肥减施导致的土壤氮库失衡、供氮潜力降低的问题。然而目前关于氮肥减施配施生物炭对土壤氮库容量及作物产量影响的研究相对较少。

土壤有机氮的转化主要是土壤微生物及其分泌的酶共同作用的结果^[11]。土壤酶参与土壤能量代谢和物质循环转化过程,是反映土壤生物性状和肥力水平的重要指标^[12]。 β -葡萄糖苷酶和纤维二糖酶参与土壤碳循环过程,对土壤中不同稳定性碳的分解和转化起重要作用^[13]。土壤脲酶、天冬酰胺酶、亮氨酸氨基肽酶以及N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶参与土壤氮循环过程,可将土壤中不同形态的氮分解为有效态氮供植物吸收利用,这对提高土壤氮素利用率有重要意义。同时前人发现氮肥减施条件下配施生物炭可显著提高土壤氮素转化相关酶活性^[14];但也有研究表明生物炭的添加会覆盖酶反应的结合点,从而抑制了某些酶促反应^[15]。目前关于氮肥减施配施生物炭对土壤酶活性的影响仍无定论。针对上述问题,本研究通过设置不同梯度的氮肥减施比例配施生物炭处理,探讨减氮配施生物炭对滴灌棉田土壤有机氮组分、氮库管理指数、土壤酶活性以及棉花产量的影响,以确定合理的减氮配施生物炭方案,为提高土壤氮库容量和土壤供氮能力及滴灌棉田持续高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于2022—2023在石河子大学教学实验场(44°32'N, 86°01'E, 海拔443 m)进行,该地区属温带干旱大陆性气候,年均气温7~8℃。年均降水量210 mm,年均潜在蒸发量1 660 mm。土壤类型为灌溉灰漠土,质地为壤土。试验地0~20 cm耕层土壤有机质11.50 g·kg⁻¹,全氮0.89 g·kg⁻¹,速效磷22.4 mg·kg⁻¹,速效钾284.0 mg·kg⁻¹。

供试生物炭由棉花秸秆在 450℃ 条件下限氧热解 6 h 制备,70℃ 烘干至恒重,粉碎过筛后密封保存。生物炭有机碳含量 $625 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组试验设计,共设置 6 个处理:(1)不施氮肥(N0);(2)常规施氮(施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,N300);(3)氮肥减施 20%(施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,N240);(4)氮肥减施 40%(施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,N180);(5)氮肥减施 20%配施生物炭(施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ +生物炭 $3.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,N240+BC);(6)氮肥减施 40%配施生物炭(施氮量 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ +生物炭 $3.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,N180+BC)。每个处理重复 3 次,共 18 个小区,小区面积为 50 m^2 ($5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$),小区间设置 1 m 宽(深度 1 m)的隔离带。

棉花分别于 2022 年 4 月 20 日和 2023 年 4 月 23 日播种,采用膜下滴灌灌溉方式,种植模式为一膜三管六行,行距($66+10$)cm,株距 10 cm。播种后滴出苗水 45 mm,生长期灌水 9 次,灌水周期 7~10 d,总灌水量 450 mm。氮肥(尿素,N 含量 46%)全部作追肥,分 6 次随水滴施(第 2~7 次灌水);磷(P_2O_5 含量 44%)、钾(K_2O 含量 52%)肥全部基施,施用量分别为 $105, 75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;每年播种前,将制备好的秸秆生物炭按量均匀撒于生物炭处理小区土壤表面,并翻耕至 0~20 cm 土层。棉花分别于 2022 年 10 月 6 日和 2023 年 10 月 11 日收获,生育期其他管理措施与当地常规大田管理一致。

1.3 样品采集及测定

于每年棉花吐絮期(9 月)在各小区随机选择 3 个样点,采集 0~20 cm 土层土壤样品并去除根系等杂物,混合均匀后置于冰盒带回实验室。一部分新鲜土样用于测定土壤水溶性有机氮;剩余土样自然风干,碾碎过筛后,用于测定土壤全氮、颗粒态有机氮、矿物结合态有机氮含量以及土壤酶活性。

土壤全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定^[16],水溶性有机氮(WON)含量采用氢氧化钠-过硫酸钾氧化法测定^[17],颗粒态有机氮(PON)和矿物结合态有机氮(MON)含量采用湿筛法测定^[18],脲酶(URE)、天冬酰胺酶(ASPG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶(NAG)、纤维二糖酶(CBH)和 β -葡萄糖苷酶(BG)活性使用 ELISA 试剂盒测定(苏州格锐斯生物科技有限公司)。

于每年棉花收获期(10 月)在各小区进行实收,测定棉花产量。

1.4 数据计算与分析

1.4.1 氮库管理指数 土壤氮库管理指数采用以下方法计算^[19]:

$$\text{氮库指数}(NPI) = C_{\text{TNs}}/C_{\text{TNr}} \quad (1)$$

式中, C_{TNs} 为样品土壤全氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{TNr} 为不施氮肥(N0)土壤全氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

$$\text{氮库活度}(NL) = C_{\text{PON}}/C_{\text{MON}} \quad (2)$$

式中, C_{PON} 为颗粒态有机氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{MON} 为矿物结合态有机氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

$$\text{氮库活度指数}(NLI) = NL_s/NL_r \quad (3)$$

式中, NL_s 为样品土壤氮库活度; NL_r 为不施氮肥(N0)土壤氮库活度。

$$\text{氮库管理指数}(NPMI) = NPI \times NLI \times 100 \quad (4)$$

1.4.2 统计分析 采用 Excel 2010 软件进行数据分析和作图,应用 SPSS 19 软件进行单因素方差分析和通径分析,若方差分析显著($P < 0.05$),采用 Duncan 法进行处理间的多重比较。使用 Origin 进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 减氮配施生物炭对土壤全氮含量的影响

由图 1 可知,两个试验年份施用氮肥和生物炭均较不施氮肥处理显著提高土壤全氮含量;氮肥减施则显著降低了土壤全氮含量,且随氮肥减施比例增加而显著降低。N240 和 N180 处理耕层土壤全氮含量较 N300 处理分别降低 14.12%~15.12% 和 23.02%~36.96%。两年的减氮配施生物炭处理(N240+BC、N180+BC)土壤全氮含量均显著高于相应减氮处理(N240、N180),2022 年和 2023 年,N240+BC 处理土壤全氮含量分别较 N240 处理增加 19.49% 和 22.86%,N180+BC 处理土壤全氮含量分别较 N180 处理增加 21.07% 和 8.42%;与 N300 处理相比,N240+BC 处理的土壤全氮含量无显著差异,N180+BC 处理的土壤全氮含量显著降低。

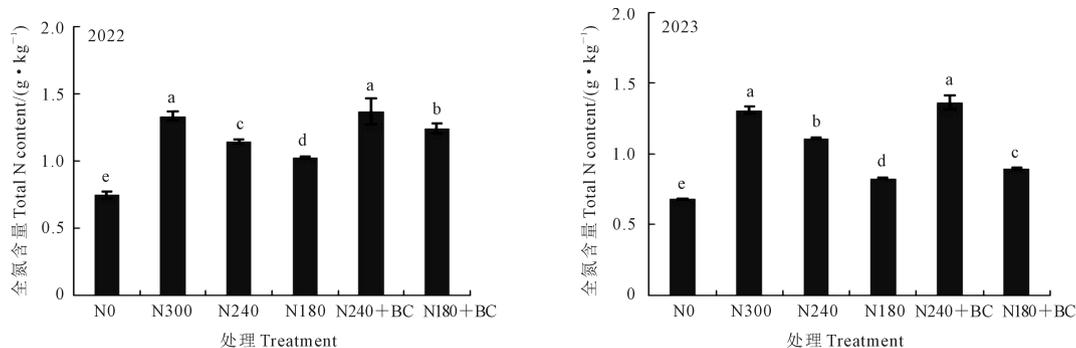
2.2 减氮配施生物炭对土壤有机氮组分的影响

由图 2 可知,两个试验年份施用氮肥和生物炭均较不施氮肥处理提高土壤有机氮组分含量,各有机氮组分含量随氮肥减施比例的增加出现不同程度降低。与 N300 处理相比,两年的 N240 处理土壤水溶性有机氮含量均无显著变化,N180 处理分别显著降低 38.93% 和 36.26%。2022 年,N240+BC 处理较 N240 处理土壤水溶性有机氮含量显著增加 8.48%,N240+BC 处理与 N300 处理无显著差异;2023 年,减氮配施生物炭处理(N240+BC、N180+BC)较相应的减氮处理(N240、N180)土壤水溶性有

机氮含量分别显著增加 42.07% 和 17.56%, N240+BC 处理土壤水溶性有机氮含量较 N300 处理显著增加 40.41%。

颗粒态有机氮含量随氮肥减施比例增加而显著降低,与 N300 处理相比,2022 年 N240 和 N180 处理土壤颗粒态有机氮含量分别降低 31.99% 和 50.92%,2023 年分别降低 42.45% 和 60.06%。氮肥

减施配施生物炭处理 (N240+BC、N180+BC) 土壤颗粒态有机氮含量均显著高于相应减氮处理 (N240、N180),增幅分别为 33.93%~38.96% (2022 年) 和 21.68%~64.65% (2023 年)。与 N300 处理相比, N240+BC 处理土壤颗粒态有机氮含量无显著变化, N180+BC 处理两年分别显著降低 34.27% 和 51.40%。2022 年,氮肥减施对土壤矿物结合态有机氮含量无



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 2022—2023 年不同处理土壤全氮含量

Fig.1 Soil total nitrogen content under different treatments in 2022–2023

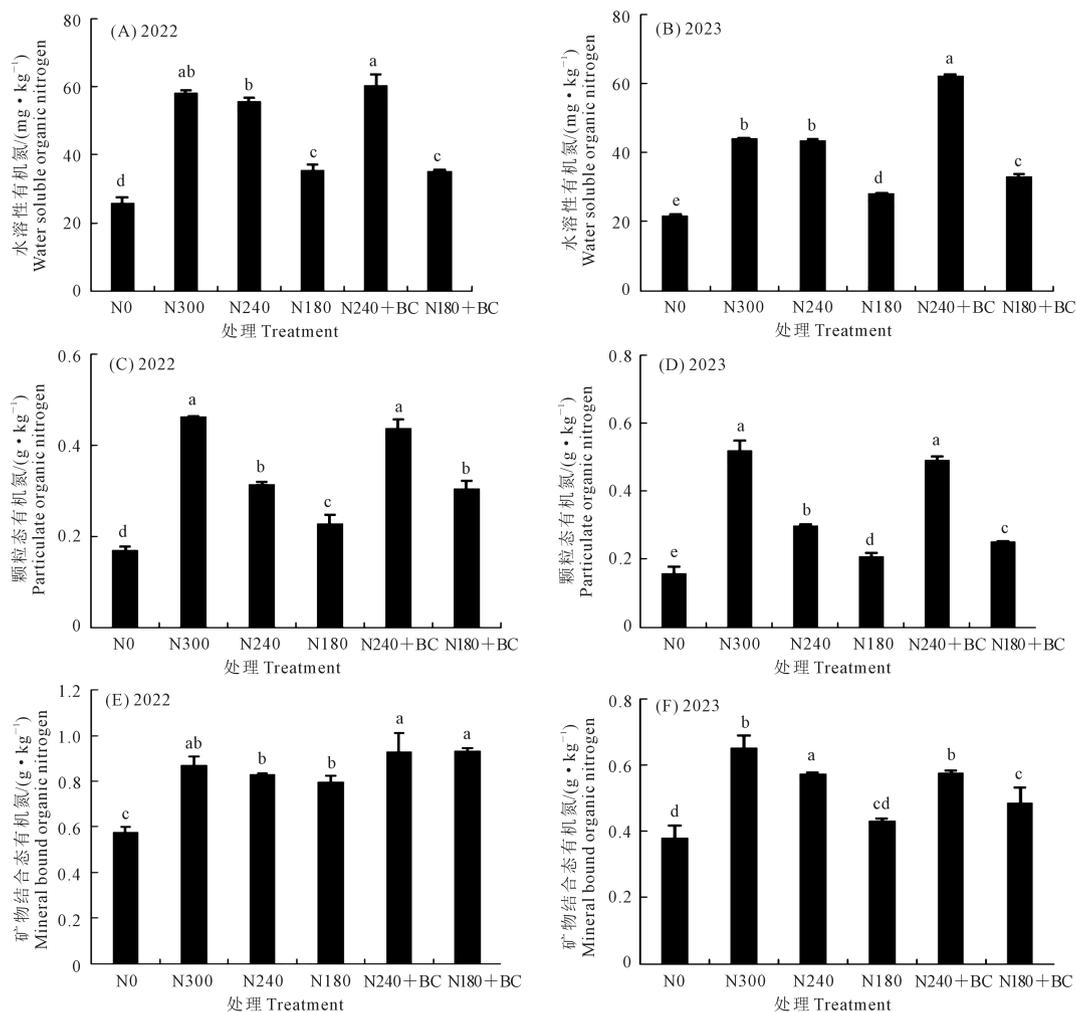


图 2 2022—2023 年不同处理土壤有机氮组分含量

Fig.2 Content of soil organic nitrogen components under different treatments in 2022–2023

显著影响, N240+BC 较 N240 处理、N180+BC 较 N180 处理土壤矿物结合态有机氮含量分别显著提高 12.13%、16.78%, N240+BC、N180+BC 处理与 N300 处理无显著差异。2023 年, N240 和 N180 处理土壤矿物结合态有机氮含量分别较 N300 处理显著降低 12.18% 和 33.80%, 减氮配施生物炭处理与相应减氮处理间土壤矿物结合态有机氮含量均无显著差异。

2.3 减氮配施生物炭对土壤氮库管理指数的影响

由表 1 可知, 两个试验年份氮肥减施处理 (N240、N180) 土壤氮库指数、氮库活度、氮库活度指数和氮库管理指数均显著低于常规施氮处理 (N300)。两年 N240+BC 处理土壤氮库管理指数及相关指标均较 N240 处理显著提高, 各指标平均增幅分别为 19.61%~22.70%、23.68%~65.38%、25.20%~63.71% 和 48.12%~101.13%; 与 N180 处理相比, 2022 年 N180+BC 处理土壤氮库指数及氮库管理指数较分别显著提高 21.90% 和 41.37%, 2023 年土壤氮库指数显著提高 8.26%; 与 N300 处理相比, N240+BC 处理土壤氮库管理指数两年均无显著变化, N180+BC 处理各指标均显著降低。

2.4 减氮配施生物炭对土壤酶活性的影响

由表 2 可知, 两个试验年份施用氮肥和生物炭均较不施氮肥显著提高土壤酶活性, 且氮肥减施处理 (N240、N180) 土壤酶活性均显著低于常规施氮处理 (N300)。2022 年, 减氮配施生物炭处理 (N240+BC、N180+BC) 较相应氮肥减施处理 (N240、N180) 亮氨酸氨基肽酶、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶、纤维二糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性分别显著增加 30.90%~90.21%、102.23%~62.24%、11.45%~29.69% 和 27.35%~10.92%, N240+BC 处理土壤天冬酰胺酶活性较

N240 处理显著提高 129.08%, 而 N180+BC 处理天冬酰胺酶活性与 N180 处理无显著差异; N240+BC 处理土壤脲酶、天冬酰胺酶、亮氨酸氨基肽酶和 β -葡萄糖苷酶活性与 N300 处理无显著差异。2023 年, 减氮配施生物炭与相应减氮处理相比, 土壤酶活性均显著提高; 与 N300 处理相比, N240+BC 处理的 N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶活性显著降低 8.60%, 而纤维二糖酶和 β -葡萄糖苷酶活性分别显著提高 14.43% 和 3.08%。

2.5 减氮配施生物炭对棉花产量的影响

由图 3 可知, 两个试验年份施用氮肥和生物炭均较不施氮肥显著提高了棉花产量, 氮肥减施显著降低棉花产量, 且减产幅度随减施年限的增加而增加。N240 和 N180 处理棉花产量较 N300 处理分别降低 8.82%~16.69% 和 19.03%~28.08%。2022 年, 减氮配施生物炭处理棉花产量较相应的减氮处理相比无显著差异, N240+BC 处理与 N300 处理棉花产量亦无显著差异。2023 年, 减氮配施生物炭处理棉花产量较相应减氮处理分别显著提高 13.79% 和 9.83%, N300 处理棉花产量与 N240+BC 处理差异不显著。

2.6 相关性分析与通径分析

对土壤全氮、有机氮各组分、土壤酶、氮库管理指数以及棉花产量进行相关性分析 (图 4)。土壤全氮含量、水溶性有机氮、颗粒态有机氮、各种土壤酶活性、氮库管理指数以及棉花产量之间均存在不同程度的显著正相关关系 ($P < 0.05$); 不同处理土壤矿物结合态有机氮与全氮之间存在正相关关系 ($P > 0.05$), 与水溶性有机氮、颗粒态有机氮、土壤酶、氮库管理指数以及棉花产量之间存在负相关关系 ($P > 0.05$)。

表 1 2022—2023 年不同处理土壤氮库管理指数及相关指标

Table 1 Soil nitrogen storage management index and related indicators under different treatments in 2022—2023

年份 Year	处理 Treatment	氮库指数 <i>NPI</i>	氮库活度 <i>NL</i>	氮库活度指数 <i>NLI</i>	氮库管理指数 <i>NPMI</i>
2022	N0	1.00±0.03e	0.30±0.01d	1.00±0.05d	100.00±3.66d
	N300	1.79±0.05a	0.53±0.02a	1.79±0.08a	320.27±4.78a
	N240	1.53±0.003c	0.38±0.02c	1.27±0.06c	196.10±10.92b
	N180	1.37±0.01d	0.28±0.03d	0.96±0.11d	131.99±15.02c
	N240+BC	1.83±0.13a	0.47±0.03b	1.59±0.11b	290.46±19.43a
	N180+BC	1.67±0.05b	0.33±0.05cd	1.11±0.17cd	186.60±32.81b
2023	N0	1.00±0.002e	0.42±0.06c	1.00±0.15c	100.00±14.32c
	N300	1.98±0.07a	0.80±0.06a	1.89±0.14a	374.93±40.02a
	N240	1.63±0.002b	0.52±0.02b	1.24±0.003b	202.07±0.87b
	N180	1.21±0.004d	0.48±0.03bc	1.14±0.07bc	138.21±8.74c
	N240+BC	2.00±0.05a	0.86±0.02a	2.03±0.04a	406.42±1.58a
	N180+BC	1.31±0.01c	0.52±0.05b	1.24±0.11b	163.05±13.53c

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments in the same year ($P < 0.05$). The same below.

表2 2022—2023年不同处理土壤酶活性

Table 2 Soil enzyme activities under different treatments in 2022–2023

年份 Year	处理 Treatment	脲酶 UR $/(\mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$	天冬酰胺酶 ASPG $/(\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$	亮氨酸氨基肽酶 LAP $/(\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$	N-乙酰-β-D-氨基 葡萄糖苷酶 NAG $/(\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$	纤维二糖酶 CBH $/(\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$	β-葡萄糖苷酶 BG $/(\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$
2022	N0	55.96±0.2d	4.44±0.1d	35.17±3.5e	49.79±2.2e	29.18±3.1e	146.00±0.4e
	N300	127.77±1.4a	22.26±1.1a	255.43±1.3a	198.47±4.0a	86.90±4.1a	354.93±3.9a
	N240	107.69±1.5b	9.56±0.6b	193.51±2.0b	93.40±0.8c	65.43±4.0c	284.15±0.2b
	N180	86.50±1.5c	8.78±0.4bc	90.63±2.3d	56.68±1.1d	52.58±3.6d	212.09±4.5d
	N240+BC	119.27±1.2ab	21.90±0.4a	253.31±3.4a	188.88±0.9b	72.92±0.6b	361.86±4.6a
	N180+BC	94.13±0.8c	7.18±1.1c	172.39±2.7c	91.96±1.4c	68.19±1.1bc	235.24±6.2c
2023	N0	45.77±0.54e	4.46±0.20e	48.76±2.30d	44.92±1.22e	21.69±0.36e	122.01±5.74f
	N300	146.40±4.99a	27.95±0.51a	328.75±9.06a	226.40±4.28a	118.59±5.71b	546.43±8.85b
	N240	109.30±1.25b	17.32±0.74b	249.75±4.90b	112.84±1.56c	100.52±4.96c	423.63±9.26c
	N180	60.71±6.44d	9.80±0.17d	169.46±4.30c	102.29±1.44d	78.04±1.10d	312.72±4.72e
	N240+BC	142.64±0.54a	28.71±0.23a	340.15±7.09a	206.92±1.13b	133.33±3.50a	563.27±8.79a
	N180+BC	92.20±3.90c	11.80±0.45c	244.56±10.79b	113.79±1.05c	118.41±3.23b	406.45±9.29d

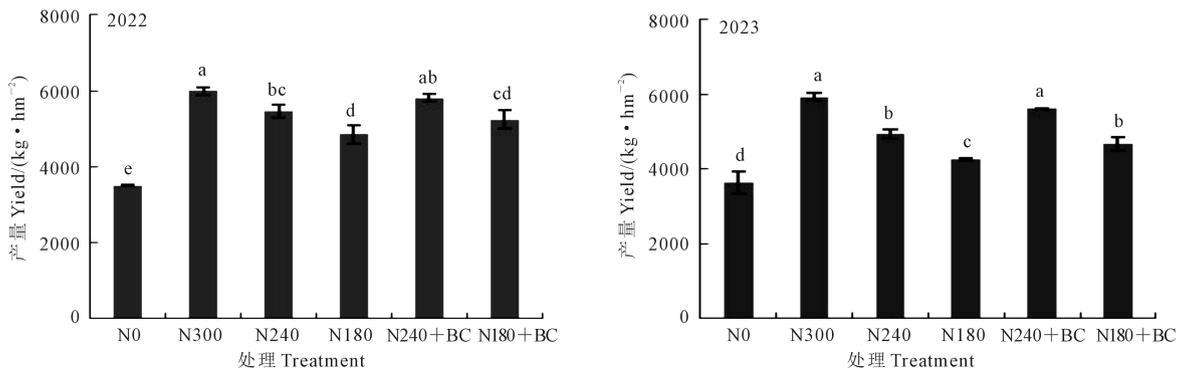
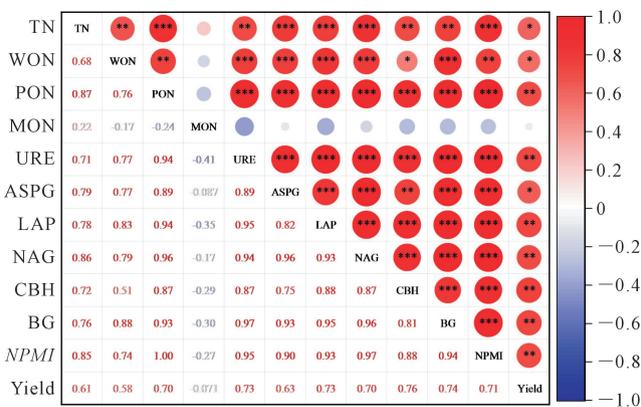


图3 2022—2023年不同处理棉花产量

Fig.3 Cotton yield under different treatments in 2022–2023



注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。TN: 全氮; WON: 水溶性有机氮; PON: 颗粒态有机氮; MON: 矿物结合态有机氮; URE: 脲酶; ASPG: 天冬酰胺酶; LAP: 亮氨酸氨基肽酶; NAG: N-乙酰基-β-D-氨基葡萄糖苷酶; CBH: 纤维二糖酶; BG: β-葡萄糖苷酶; NPMI: 氮库管理指数; Yield: 产量。

Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. TN: Total N; WON: Water soluble organic; PON: Particulate organic; MON: Mineral bound organic; URE: Urease; ASPG: Asparaginase; LAP: Leucine aminopeptidase; NAG: N-acetyl-β-D-glucosaminidase; CBH: Cellobiase; BG: β-glucosidase; NPMI: Nitrogen pool management index.

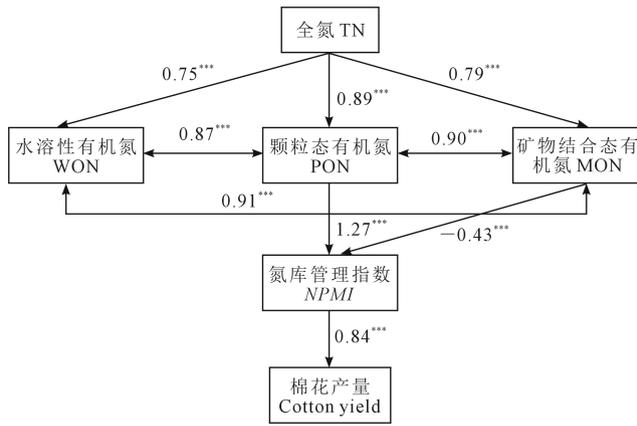
图4 土壤有机氮组分、酶活及棉花产量间的相关分析

Fig.4 Correlation analysis between soil organic nitrogen components, soil enzyme activity and cotton yield

进一步采用通径分析探究土壤全氮、有机氮组分、氮库管理指数和棉花产量之间的相互关系(图5)。全氮及有机氮各组分相互间存在极显著的正向作用($P < 0.01$);颗粒态有机氮对氮库管理指数(通径系数为1.27, $P < 0.01$)有极显著的正向影响,矿物结合态有机氮对氮库管理指数(通径系数为-0.43, $P < 0.01$)有极显著的负向影响;氮库管理指数对棉花产量(通径系数为0.84, $P < 0.01$)有极显著的正向影响。

3 讨论

全氮是评价土壤肥力的重要指标之一,对作物生长、土壤氮素循环和供应具有重要作用^[20]。本研究表明,与常规施氮量相比,氮肥减施显著降低了土壤全氮含量,减氮20%配施生物炭处理土壤全氮含量无显著变化,减氮40%配施生物炭处理的土壤全氮含量显著降低。表明生物炭对土壤氮素积累有一定的积极作用,这与张帅等^[21]研究结果相似,可能是因为氮肥和生物炭配施可以通过增加无机氮的生物和非生物固定,减少氮肥淋洗损失,增加



注: 图中数字为通径系数, *** $P < 0.001$ 。

Note: The figures indicate the path coefficient. *** $P < 0.001$.

图 5 有机氮各组分、氮库管理指数及棉花产量间的通径分析

Fig.5 Path analysis of organic nitrogen components, nitrogen pool management index, and cotton yield

了氮的滞留;同时土壤碳、氮之间存在相互调节机制,外源碳的输入会抑制微生物对土壤氮的矿化速率。氮肥过量减施会显著降低土壤氮素输入,降低土壤氮素供应能力,施用生物炭不足以弥补土壤氮库容量^[20]。土壤全氮含量的变化无法全面反映氮库各组分的变化。因此,研究减氮配施生物炭对土壤有机氮各组分的影响存在更深远的意义。

研究表明,施用生物炭会影响土壤不同形态有机氮的相互转化^[22]。土壤有机氮组分中颗粒态有机氮和水溶性有机氮组分对施肥措施的响应更为敏感,常被用来指示土壤有机氮的动态变化^[23];而矿物结合态有机氮更耐降解,属于惰性有机氮。本研究发现,氮肥减施显著降低了土壤颗粒态有机氮含量,而减氮 20% 配施生物炭处理的土壤水溶性有机氮和颗粒态有机氮含量较相应的减氮处理显著增加,且与常规处理相比无显著差异,可能是因为生物炭添加可以促进土壤活性有机氮积累^[24]。生物炭的多孔结构可以为微生物提供生存环境,且对土壤中无机氮具有一定的吸附作用,通过微生物作用将无机氮转化为水溶性有机氮,同时土壤中水溶性有机氮也可以被生物炭吸附,作为土壤中活跃的有机氮组分为作物生长提供氮素。同时,生物炭与颗粒态有机氮官能团间的吸附作用可以在短期内显著提高土壤颗粒态有机氮含量^[25]。本研究还发现,随氮肥减施比例的增加,土壤矿物结合态有机氮含量呈降低趋势,这与氮肥减施降低了土壤氮素的输入有直接关系。添加生物炭可提高土壤氮库的稳定性,促进活性组分向稳定态组分的转移,提高土壤矿物结合态有机氮含量和持续稳定供应氮

素的能力。本研究也发现,与相应的减氮处理相比,两年各减氮配施生物炭处理土壤矿物结合态有机氮含量均有提高,2022 年提升效果更显著。研究表明,氮肥减施会降低土壤氮库容量,抑制土壤氮库活性,同时降低土壤供氮能力^[26]。本研究表明,氮肥减施显著降低了土壤氮库活性指数和氮库管理指数,2022 年和 2023 年氮肥减施 20% 配施生物炭处理的土壤氮库指数较氮肥减施 20% 处理分别显著提高至 290.46 和 406.42。说明施用生物炭可增加土壤中活性有机氮组分,提高土壤供氮能力。由于施用生物炭增加了土壤外源碳的输入,造成土壤有机碳、氮累积速率明显差异,故施用生物炭的棉田土壤有机碳含量显著提高,进而导致活性有机氮积累速率加快,最终增加活性有机氮积累^[27]。

土壤酶既是土壤有机物转化的执行者,又是植物营养元素的活性库。土壤中养分的循环和转化等过程都离不开土壤酶的参与,脲酶、天冬酰胺酶、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶主要参与氮循环过程, β -葡萄糖苷酶和纤维二糖酶主要参与土壤的碳转化^[28]。本研究表明,氮肥减施会显著降低土壤各类酶活性,与对应的减氮处理相比,添加生物炭可以提高土壤酶活性,尤其对亮氨酸氨基肽酶和 β -葡萄糖苷酶活性的提高更为显著。这与前人研究结果相似,可能是因为生物炭具有强吸附性,能吸附酶促反应底物,对酶促反应具有正向影响,进而对土壤酶活性产生正效应;同时,化肥配施生物炭可以有效提高土壤养分供应,促进植株根系生长和分泌能力,从而提高土壤酶活性。但也有研究表明,生物炭的添加会抑制土壤碳周转过程,如土壤碳矿化的过程,从而抑制与碳循环相关酶活性,但增加了与氮循环相关的酶活性^[26]。还有研究发现,生物炭会吸附土壤中的酶分子,覆盖酶反应的结合点,进而抑制某些酶促反应^[28]。研究结果有差异可能是因为不同生物炭类型导致的某些官能团不同,以及土壤碳氮转化酶活性易受外界条件影响表现出复杂的差异性。

有研究表明,氮肥过量施用后无法全部被作物吸收利用,生物炭与化肥氮结合施用可显著提高氮肥利用率,实现最佳的作物产量^[29]。本研究中,氮肥减施显著降低了棉花产量,且降幅随氮肥减施比例和施用年限的增加而增大,2023 年减氮配施生物炭处理较相应减氮处理棉花产量显著提高;两年减氮 20% 配施生物炭处理棉花产量与常规施氮相比均无显著差异,这与孔德杰等^[30]研究结果一致,表明施用生物炭可以显著提高作物产量。一方面,农

田土壤中添加生物炭可以提高土壤对氮素的吸附能力,促进氮储量较低的土壤向作物持续供氮的能力,缓解因氮肥用量不足造成的减产^[31];另一方面,由于生物炭自身具有微小的孔隙结构,施入土壤后不仅可以提高土壤养分的固持作用,还会吸附土壤中的水分,促进作物根系的生长和发育^[32]。此外,吴迪等^[33]研究证实,长期施用生物炭后大豆光合作用增强,产量显著提高。相关性分析和通径分析结果表明,土壤酶活性与活性有机氮各组分之间均存在显著的相互影响。土壤全氮、颗粒态有机氮对氮库管理指数存在极显著的正向影响,矿物结合态有机氮对氮库管理指数存在极显著的负向影响;同时,氮库管理指数对棉花产量也存在极显著的正向影响。颗粒态有机氮和水溶性有机氮是土壤活性有机氮库,当土壤有效氮不足时其可矿化为无机氮,为作物提供氮素营养^[34]。因此,施用生物炭可能是通过提高土壤酶活性增加土壤活性有机氮含量,减少活性氮损失,从而提高棉花产量。综上所述,氮肥减施配施生物炭显著增加土壤活性有机氮组分的含量,同时提高土壤酶活性和棉花产量,对滴灌棉田土壤肥力提高和棉花增产增效具有重要意义。

4 结 论

(1)与常规施氮相比,氮肥减施处理土壤全氮含量显著降低 14.12%~36.96%,土壤有机氮组分含量以及氮库管理指数也显著降低;氮肥减施配施生物炭较相应减施处理显著提高土壤全氮含量,同时维持土壤有机氮各组分以及氮库管理指数稳定,其中氮肥减施 20%配施生物炭处理土壤全氮、水溶性有机氮、颗粒态有机氮含量和氮库管理指数分别提高 19.49%~22.86%、8.48%~42.77%、38.96%~64.65%和 48.12%~101.13%。

(2)与常规施氮相比,氮肥减施显著降低了土壤酶活性和棉花产量;氮肥减施配施生物炭不同程度地提高了土壤酶活性及棉花产量,其中氮肥减施 20%配施生物炭较相应的氮肥减施处理土壤酶活性和棉花产量分别显著提高 11.45%~128.54%和 6.36%~13.79%;与常规施氮相比,两年氮肥减施 20%配施生物炭处理棉花产量均维持稳定,氮肥减施 40%配施生物炭处理棉花产量显著降低。

综上,氮肥减施 20%配施生物炭有助于维持新疆滴灌棉田土壤氮库容量和供氮潜力,保证棉花产量。

参 考 文 献:

- [1] 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 160-165.
XIE Z L, TIAN C Y. Coupling effects of water and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen uptake and water-nitrogen use efficiency of cotton under mulched drip irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 160-165.
- [2] 戴明, 张一敏. 水氮耦合对水稻根区土壤氮素累积及其产量的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 168-173.
DAI M, ZHANG Y M. Effects of coupling of water and nitrogen on the accumulation of soil nitrogen in root zone and yield of rice[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 168-173.
- [3] SUN C, CHEN L, ZHAI L M, et al. National assessment of nitrogen fertilizers fate and related environmental impacts of multiple pathways in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123519.
- [4] 吴传发, 熊超, 韩燕来, 等. 秸秆还田结合减氮调控旱地土壤硝化潜势维持作物产量的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1782-1793.
WU C F, XIONG C, HAN Y L, et al. Mechanism of combination of nitrogen fertilizer reduction and straw returning in regulating dryland nitrification intensity and keeping stable crop yield in long run[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 26(10): 1782-1793.
- [5] 王盈盈, 夏龙, 蔡思源, 等. 长期不施氮肥下稻麦轮作农田残留化肥氮的后效及去向[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1626-1639.
WANG Y Y, XIA L L, CAI S Y, et al. Long-term fate and availability of residual fertilizer nitrogen in rice-wheat cropping system in Taihu lake region of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(6): 1626-1639.
- [6] 王芳东, 吕伟生, 符明金, 等. 密植减氮对三熟区不同肥力红壤稻田作物产量和耕层氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 285-291.
WANG F D, LV W S, FU M J, et al. Effects of high-density and low-nitrogen on crop yield and soil nitrogen storage in plough layer of red paddy field with different soil fertility in triple-cropping area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 285-291.
- [7] 邹真真, 程红光, 王建童, 等. 生物炭添加比例及冻融对沟渠土壤氮素淋失的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1295-1302.
WU Z Z, CHENG H G, WANG J T, et al. Effects of biochar addition rate and freeze-thaw cycles on soil nitrogen leaching in agricultural ditches[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4): 1295-1302.
- [8] 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 176-185.
WU A L, WANG J S, DONG E W, et al. Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 176-185.
- [9] 段春燕, 沈育伊, 徐广平, 等. 桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4234-4245.
DUAN C Y, SHEN Y Y, XU G P, et al. Effects of eucalyptus branches biochar application on soil physicochemical properties of acidified soil in a eucalyptus plantation in northern Guangxi[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4234-4245.
- [10] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4246-4252.
YANG C D, LU S G. Dynamic effects of direct returning of straw and corresponding biochar on acidity, nutrients, and exchangeable properties of red soil[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4246-4252.
- [11] 陈俊朴, 黄圣杰, 陈涛, 等. 不同地面覆盖模式对樱桃园土壤活性

- 有机碳组分及相关酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2465-2472.
- CHEN J P, HUANG S J, CHEN T, et al. Effects of different mulching patterns on soil active organic carbon components and related enzyme activities in cherry orchard[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2465-2472.
- [12] CHEN L, LIU M J, ALI A, et al. Effects of biochar on paddy soil fertility under different water management modes[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(4): 1810-1818.
- [13] BOYLE S A, YARWOOD R R, BOTTOMLEY P J, et al. Bacterial and fungal contributions to soil nitrogen cycling under douglas fir and red alder at two sites in oregon[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2): 443-451.
- [14] JING Y L, ZHANG Y H, HAN I, et al. Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8837.
- [15] SINSABAUGH R. Fungal enzymes at the community scale[M]//DIGHTON J, WHITE J F. The Fungal Community. Boca Raton: CRC Press, 2005: 12.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] JONES D L, WILLETT V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 991-999.
- [18] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulatesoil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.
- [19] BLAIR G, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [20] 童珊, 曹广超, 张卓, 等. 土壤全碳全氮空间异质性及影响因素分析-以祁连山南坡黑河上游为例[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1064-1072.
- TONG S, CAO G C, ZHANG Z, et al. Analysis of spatial heterogeneity and influencing factors of soil total carbon and nitrogen-take the upper reaches of Heihe river on southern slope of Qilian mountain as an example[J]. Soils, 2022, 54(5): 1064-1072.
- [21] 张帅, 成宇阳, 吴行, 等. 生物炭施用下潮土团聚体微生物量碳氮和酶活性的分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 369-379.
- ZHANG S, CHENG Y Y, WU H, et al. Microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities within aggregates of calcareous soil under biochar application[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 27(3): 369-379.
- [22] OMARA P, AULA L, OTIM F, et al. Biochar applied with inorganic nitrogen improves soil carbon, nitrate and ammonium content of a sandy loam temperate soil[J]. Nitrogen, 2022, 3(1): 90-100.
- [23] 史文欣. 玉米秸秆还田配施微生物菌剂对小麦产量及土壤碳氮组分的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- SHI W X. Effects of corn straw returning combined with microbial agents on wheat yield and soil carbon and nitrogen components [D]. Tian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [24] 高梦雨, 江彤, 韩晓日, 等. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2126-2135.
- GAO M Y, JIANG T, HAN X R, et al. Effects of applying biochar-based fertilizer and biochar on organic carbon fractions and contents of brown soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2126-2135.
- [25] 廖添怀, 李欢, 王艳玲. 稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及 CH₄ 和 CO₂ 累积排放量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1598-1609.
- LIAO T H, LI H, WANG Y L. Effects of addition of rice straw and rice straw biochar on soil organic carbon fractions and cumulative emissions of CH₄ and CO₂ in reddish paddy soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(7): 1598-1609.
- [26] 王智. 不同施氮量下秸秆还田对棉花产量形成与氮肥利用效率的影响及其机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- WANG Z. Effects of straw returning under different nitrogen fertilizer rates on cotton yield formation and nitrogen use efficiency [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [27] 悦飞雪, 李继伟, 乔鑫鑫, 等. 生物炭对豫西丘陵农区农田土壤团聚体稳定性及碳、氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 265-272.
- YUE F X, LI J W, QIAO X X, et al. Effects of biochar application on soil aggregates stability and organic carbon and total nitrogen distribution in the hilly area of western Henan province, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 265-272.
- [28] 宋霄君, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1588-1597.
- SONG X J, WU H J, WU X P, et al. Long-term conservation tillage improves surface soil carbon and nitrogen content and rhizosphere soil enzyme activities[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(6): 1588-1597.
- [29] 张莉, 马国珠, 谷彩花, 等. 生物炭还田方式对冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(10): 1283-1290.
- ZHANG L, MA G Z, GU C H, et al. Effect of biochar returning manners on grain-filling characteristics and grain yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(10): 1283-1290.
- [30] 孔德杰, 朱金霞, 任成杰, 等. 麦豆长期轮作下秸秆还田对土壤碳氮组分及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(5): 190-200.
- KONG D J, ZHU J X, REN C J, et al. Effects of straw return on soil carbon and nitrogen components and crop yield under long-term wheat-soybean rotation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(5): 190-200.
- [31] PETER O, LAWRENCE A B. Biochar application in combination with inorganic nitrogen improves maize grain yield, nitrogen uptake, and use efficiency in temperate soils[J]. Agronomy, 2020, 10(9): 1241-1241.
- [32] 焦敏娜, 周鹏, 孙权, 等. 不同改性生物炭及施用量对风沙土土壤团聚体及牧草产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (6): 34-40.
- JIAO M N, ZHOU P, SUN Q, et al. Effects of different modified biochars and application rates on soil aggregates and forage yield in aeolian sandy soil [J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020, (6): 34-40.
- [33] 吴迪, 袁鹤翀, 顾闻琦, 等. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 37-45.
- WU D, YUAN H C, GU W Q, et al. Photosynthetic physiological metabolism and yield response of continuous soybean cropping mediated by long-term application of biochar[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 37-45.
- [34] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils[J]. Geoderma, 2019, 336: 1-11.